

Отчет к домашнему заданию №2: Рандомизатор и расчёт PAPR

Квинтэссенция работы

Эта работа представляет собой небольшую модернизацию базовой модели OFDM-передатчика и приёмника. Был добавлен рандомизатор (скрэмблер) и соответственно дерандомизатор (дескрэмблер) в целях уменьшения PAPR. Также добавлены функции расчёта PAPR по OFDM-символам, а также функции построения CCDF.

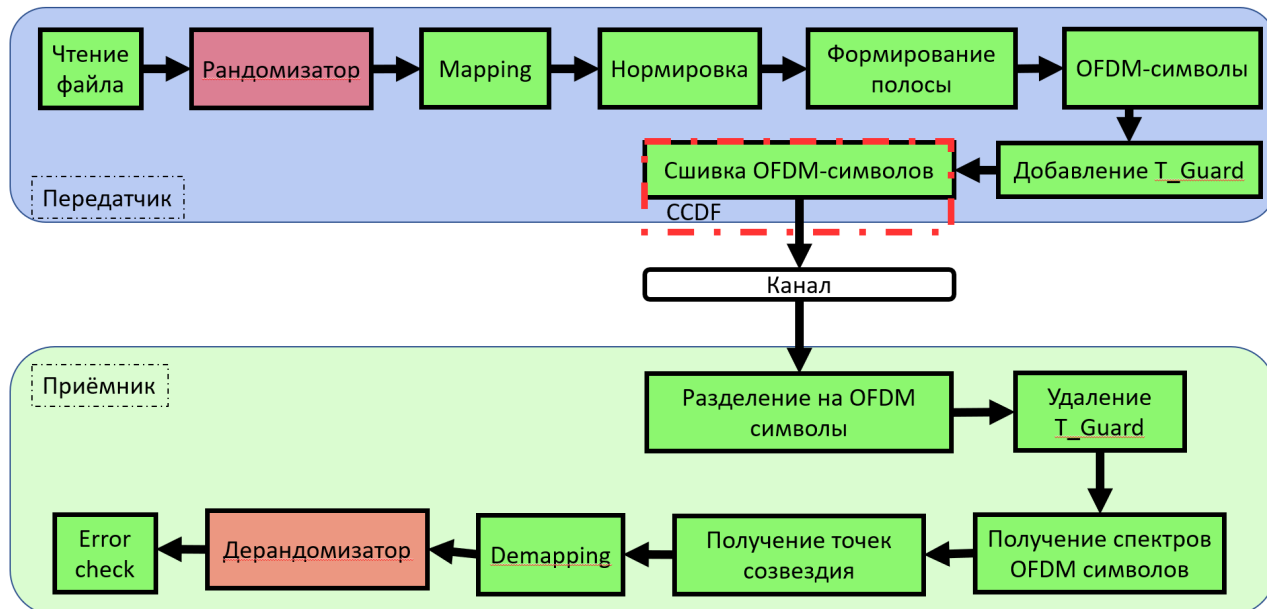


Рисунок №1. Пайплайн OFDM-системы

Что такое PAPR?

$$PAPR_{db} = 10 \log_{10} \left[\frac{\max_{i \in [0, N_{fft}]} (|s(n)|^2)}{\text{mean}_{i \in [0, N_{fft}]} (|s(n)|^2)} \right]$$

Рисунок №2. Формула для расчёта PAPR

PAPR (peak-to-average power ratio) - пик фактор или отношение пиков мощности OFDM-сигнала к среднему значению мощности. Оценка PAPR полезна тем, что позволяет численно характеризовать явление, когда внутри одного OFDM-символа наблюдаются резкие всплески сигнала по амплитуде из-за того, что передаются сразу несколько частот (синусоид), которые при наложении друг на друга могут дать резкое усиление в амплитуде. И нам важно следить за высоким PAPR, ибо так или иначе наш сигнал будет проходить через усилитель, который имеет свою характеристику усиления (рисунок 2). И тут возможно два варианта:

- либо мы к средней мощности сигнала прибавляем мощность пиков, из-за чего пики усиливаются сильно, а другие отсчёты сигнала слабо (с инженерной точки зрения это плохо тем, что происходит неэффективное использование усилителя - большая часть энергии будет тратиться на усиление редких пиков, в то время как основная часть будет усиливаться слабо, кроме того это повышает требования к самому усилителю, ведь теперь нужен усилитель с большим динамическим диапазоном, что усложняет и удорожает всю схему);

- либо мы делаем так, что средняя мощность сосредоточена в окрестности точки В, для того чтоб основные отсчёты сигнала усиливались в окрестности точки В - это приведёт к тому, что некоторые точки с изначально высокой мощностью будут выбиваться в нелинейную область С, почему будет происходить обрезание по мощности (клиппирование) и потеря информации.

Поэтому важно, чтоб PAPR не превышал определённого уровня. Иначе в реальной системе связи получаем такие негативные эффекты, как клиппирование, проявление внеполосового излучения и, как следствие, снижение качества передачи.

Усилитель мощности

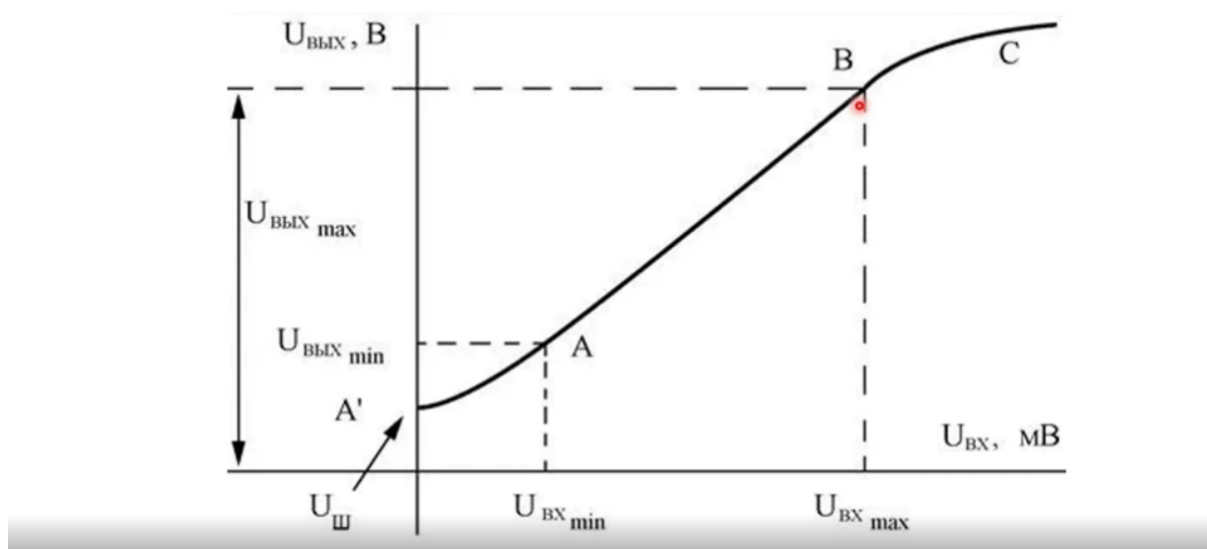


Рисунок №3. Характеристика усилителя

Что такое CCDF(PAPR)?

CCDF (PAPR) - это комплементарные интегральные функции распределения (CCDF -complementary-cumulative-distribution-function) пик-фактора. Эта функция говорит нам о вероятности того, что пик-фактор OFDM-символа превышает данный уровень PAPR.

CCDF лучше простого PAPR тем, что даёт нам некоторое представление о том, в каком количестве резкие пики присутствуют в сигнале и можно ли их игнорировать (к примеру, если у нас большие значения PAPR имеют очень маленькую вероятность появления, то мы можем с ними смириться и ничего не предпринимать для уменьшения значений PAPR). Но в то же время недостаток этого способа оценки пик-фактора заключается в необходимости проведения расчета PAPR с помощью скользящего окна по всему

OFDM-сигналу, что усложняет вычисления.

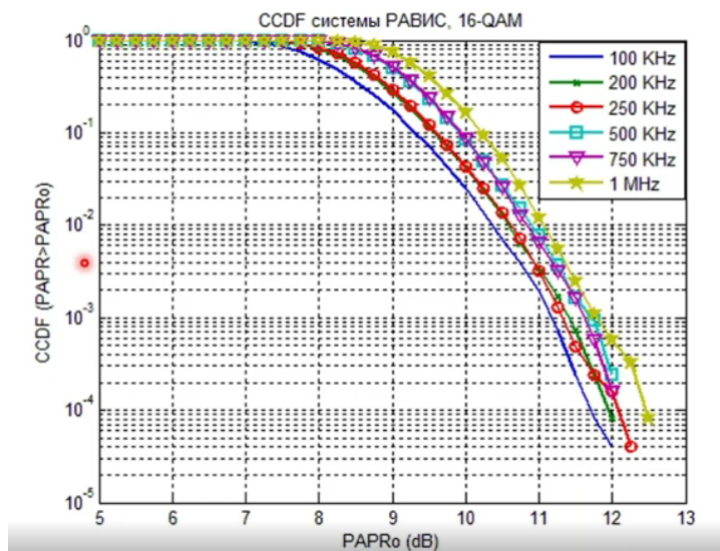


Рисунок №4. Пример CCDF-кривых

PAPR сигнала с рандомизацией vs PAPR обычного сигнала

Процесс рандомизации

Рандомизация производится на основе РСЛОС (регистр сдвига с линейной обратной связью). Схема рандомизации представлена на рисунке 5. Т.е. мы проходим операцией `xor` по регистру состояния, учитывая заранее заданные коэффициенты, далее результат этого прохода мы запоминаем как `feedback` и потом циклически сдвигаем регистр, заменяя 1 бит этим значением. Далее `feedback` ещё раз подаём на вход функции `xor`, но уже вместе с входным потоком бит. И так на выходе получается рандомизированный поток бит.

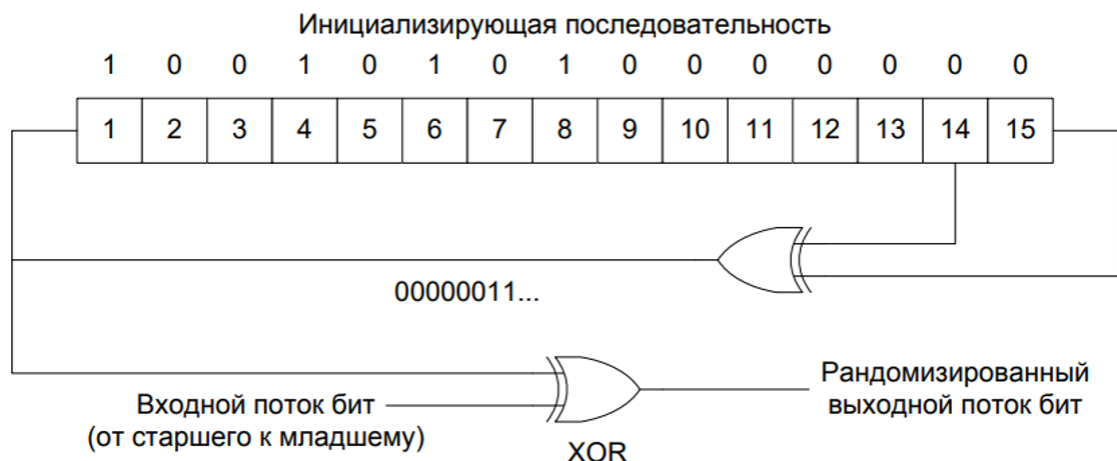


Рисунок №5. Схема рандомизации битового потока на основе РСЛОС

Параметры скрамблера

- Начальное состояние регистра: `Register = [1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0]`;
- Маска коэффициентов: `coeff_mask=[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1]`

Для системы рандомизатор нужен для того, чтобы уменьшить вероятность того, что у нас одна синусоида накладывается на другую, за счет чего появляются резкие пики в сигнале. Другими словами, рандомизатор уменьшает коррелированность входного потока бит (коррелированный поток бит в контексте сигнальных созвездий означает, что у нас точки сигнала неравномерно распределяются между всеми точками

сигнального созвездия, а с существенными перекосами по количеству в сторону определённых точек созвездия). Однако это плохо тем, что мы не можем извлечь информацию из принятого сигнала сразу же, т.е. нам необходимо произвести дерандомизацию. Т.е. наша система связи усложняется из-за добавления блоков рандомизации - дерандомизации.

Результат сравнения

В данном случае PAPR рассчитывался по формуле, указанной на рисунке 2. 1 значение на весь сигнал из 50 ofdm-символов.

- PAPR обычного и рандомизированного сигналов

```
PAPR обычного сигнала равен: 23 dB
```

```
PAPR рандомизированного сигнала равен: 10 dB
```

```
Проверка пройдена!
```

```
Проверка с рандомизатором пройдена!
```

Рисунок №6. Пример работы программного кода

Как видно из работы кода, при рандомизации значение PAPR 23 dB, а без неё 10 dB - PAPR с рандомизацией лучше. На мой взгляд, отличие связано с тем, что поскольку передаётся картинка, то мы имеем коррелированный поток бит, из-за чего при OFDM-модуляции некоторые синусоиды складываются и дают ощутимые пики во временной области, а когда мы рандомизируем наш битовый поток, мы убираем коррелированность в данных, поэтому пики перестают иметь такие большие значения, как имели до.

CCDF(PAPR) сигнала с рандомизацией vs CCDF(PAPR) обычного сигнала

В данном случае PAPR рассчитывался по формуле, указанной на рисунке 2, но теперь использовалось скользящее окно размером в `nfft = 1024` отсчёта, со сдвигом в `1` отсчёт, опять же для 50 ofdm-символов. CCDF же рассчитывалась по полученным значениям оконного PAPR по формуле, представленной на рисунке 7.

$$CCDF(X) = \Pr(PAPR_{dB} > X)$$

Где $\Pr(PAPR_{dB} > X)$ - вероятность того, что пик-фактор OFDM символа превышает величину X

Рисунок №7. Формула CCDF

CCDF(PAPR) для обычного и рандомизированного сигналов

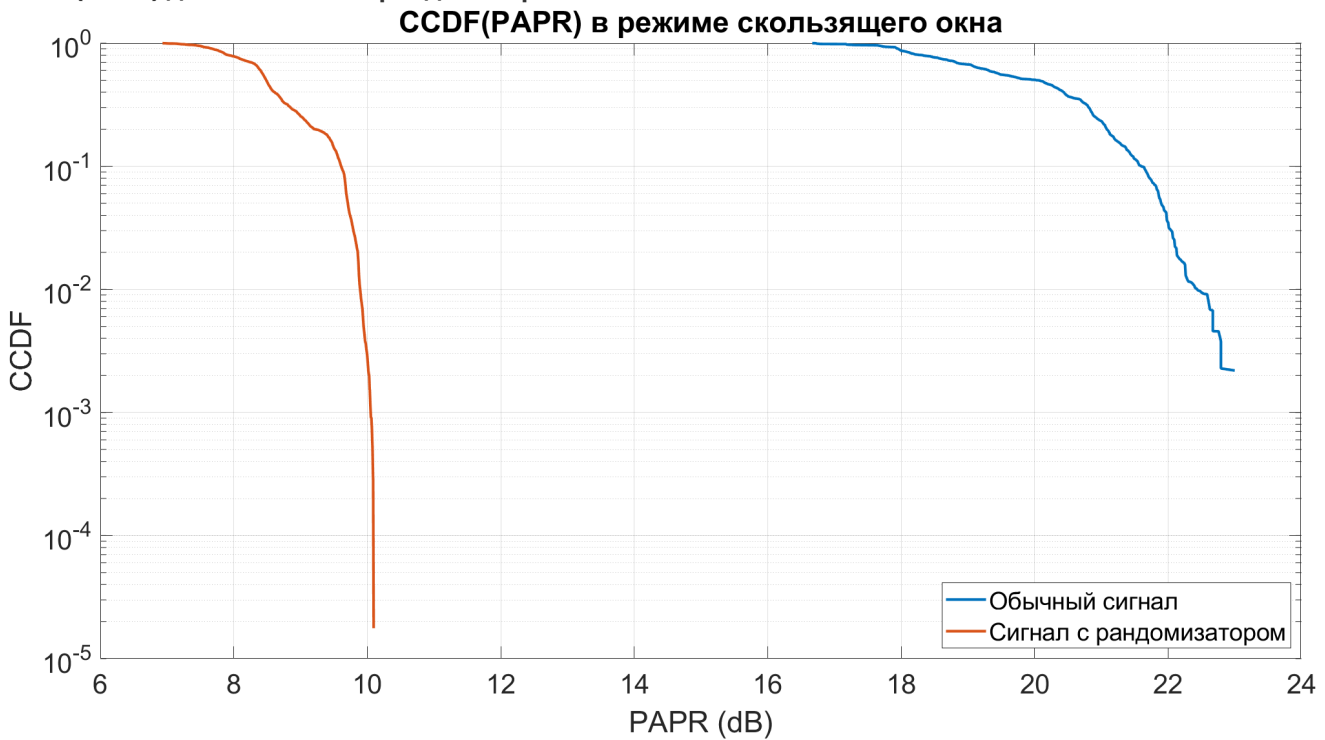


Рисунок №8. CCDF обычного сигнала и рандомизированного сигнала

Отличия. Говоря о конкретных значениях, можно выделить следующее:

- Пик-фактор рандомизированного сигнала с вероятностью в 0,02 превышает значение примерно 10 dB;
- Пик-фактор обычного сигнала с вероятностью в 0,02 превышает значение примерно 22 dB.

Качественное сравнение:

Во-первых, CCDF рандомизированного сигнала находится слева относительно CCDF обычного сигнала - значения PAPR с рандомизатором в целом ниже. Во-вторых, наблюдается более резкий спад CCDF в рандомизированном случае - это говорит о том, что различных значений PAPR в рандомизированном OFDM-сигнале в целом меньше, если сравнивать с обычным OFDM-сигналом.

Лучший сценарий. Очевидно, лучшим сценарием является использование рандомизированного OFDM-сигнала, потому что PAPR в целом меньше и мощность пиков ближе к средней мощности сигнала.

Причина различий в PAPR. Как уже отмечалось выше, рандомизация убирает коррелированность передаваемого потока бит, что в свою очередь уменьшает возможные пики из-за наложения синусоид.